

**Н. Н. ИГНАТЕНКО**, канд. тех. наук, зав. сектором, НТУ «ХПИ»

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРОВ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ**

Для підвищення ефективності роботи генераторів великих імпульсних струмів запропоновано в його розрядному контурі використовувати раціонально вибрану коректуючу ємність. Показано, що за допомогою генератора імпульсної напруги та коректуючої ємності можливе формування зрізаної імпульсу високої напруги з заданим часом зростання.

For increasing efficiency of work of generators of high pulsed currents, it is proposed to use rationally chosen corrective capacitance in their discharging circuit. It is shown that with help of generator of pulsed voltage and corrective capacitance it is possible to form chopped pulse of high voltage with the given rise time.

**Введение.** В высоковольтной импульсной технике находят широкое применение генераторы импульсных токов и напряжений. В частности, указанные генераторы импульсных токов (ГИТ) используются при магнитно-импульсной обработке металлов, а генераторы импульсных напряжений (ГИН) могут быть применены для высоковольтных испытаний по ГОСТ 30585-98 изоляционных конструкций. Для генераторов ГИТ важными характеристиками являются не только максимальное рабочее напряжение и емкость накопителя, но и  $\eta_p$  – коэффициент полезного действия (КПД) разрядного контура. Численное значение коэффициента  $\eta_p$  может быть определено из выражения [1]:

$$\eta_p = \frac{W_n}{W_0}, \quad (1)$$

где  $W_n$  – энергия, передаваемая в нагрузку генератора при разряде его емкостного накопителя энергии (ЕНЭ);  $W_0$  – количество энергии, которая запасается в высоковольтных емкостях накопителя.

При проведении оценок величины коэффициента  $\eta_p$  для классического генератора ГИТ, работающего в колебательном режиме, можно видеть, что его численное значение сильно зависит от собственной индуктивности накопителя  $L_0$  и величины  $RL$ -нагрузки. Значительная величина индуктивности емкостного накопителя  $L_0$  приводит к тому, что рассматриваемые классические генераторы ГИТ редко имеют значение коэффициента  $\eta_p$  более 0,5.

Достаточно часто генераторы ГИН используют при испытаниях высоковольтных конструкций на действие срезанного импульса напряжения. В разрядном контуре данного генератора используется «срезающий» разрядник, который настраивается так, чтобы он срабатывал в момент достижения напряжением на нагрузке  $u_p(t)$  своего максимального значения. Из анализа работы такого генератора следует, что в этом случае амплитудное значение напряжения  $u_p(t)$  может быть равно рабочему напряжению емкостного накопителя  $U_0$ .

Значительно повысить коэффициент  $\eta_p$  в генераторе ГИТ и амплитуду напряжения в нагрузке высоковольтного ГИН позволяют установки, схемы замещения разрядных контуров которых показаны на рис. 1 и рис. 2. В разрядный контур указанных высоковольтных установок введены корректирующие емкости  $C_K$  [2-5]. Проведем анализ работы генераторов (рис. 1 и рис. 2) и покажем, что введение рационально выбранных корректирующих емкостей позволяет повысить энергетическую эффективность ГИТ и ГИН.

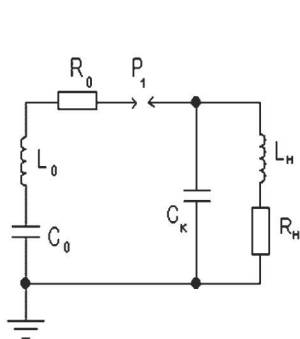


Рисунок 1 – Схема замещения генератора ГИТ с применением емкости  $C_K$

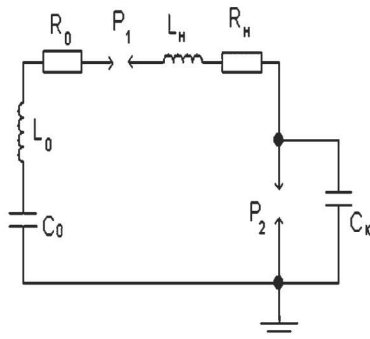


Рисунок 2 – Схема замещения ГИН с использованием  $C_K$

**Анализ работы генератора ГИТ с применением емкости  $C_K$ .** При проведении расчетов в схеме замещения генератора (схема ГИТ рис. 1) полагаем, что величина активных сопротивлений  $R_0$  и  $R_n$  мала и их влиянием на ток в нагрузке  $i_n(t)$  можно пренебречь. Проводя расчет схемы замещения генератора операторным методом, представим оригинал тока  $i_n(t)$  в следующем виде:

$$i_n(t) = \frac{U_0}{2L_n L_0 C_K b^2} \left( \frac{\sin ct}{c} - \frac{\sin mt}{m} \right); \quad (2)$$

$$b^2 = \left[ 0,25(C_0 L_0 + C_0 L_n + C_K L_n)^2 (C_0 L_0 C_K L_n)^{-2} - (C_0 L_0 C_K L_n)^{-1} \right]^{0,5};$$

$$c = \left[ 0,5(C_0 L_0 + C_0 L_n + C_K L_n) (C_0 L_0 C_K L_n)^{-1} - b^2 \right]^{0,5};$$

$$m = \left[ 0,5(C_0 L_0 + C_0 L_n + C_K L_n) (C_0 L_0 C_K L_n)^{-1} + b^2 \right]^{0,5}.$$

Из выражения (2) следует, что при применении емкости  $C_K$  в разрядном контуре генератора ГИТ возникают две круговые частоты  $m$  и  $c$ . Если для круговых частот выполняется условие:

$$m = 3c; \quad (3)$$

то амплитуда тока  $i_n(t)$  в нагрузке генератора будет максимально возможной. Используя (3), можем определить рациональное значение корректирующей емкости  $C_K$  в исследуемом генераторе импульсных токов:

$$C_K = k - \sqrt{k^2 - C_0^2 (L_0 + L_n)^2 L_n^{-2}}, \quad (4)$$

где  $k = 5,56 C_0 L_0 / L_n - C_0 (L_0 + L_n) / L_n$ .

Если емкость  $C_k$  в генераторе импульсных токов выбрана из соотношений (3) и (4), то выражение для тока  $i_n(t)$  можно представить в виде:

$$i_n(t) = \frac{2U_0}{3L_n L_0 C_k b^2 c} \sin^3(ct). \quad (5)$$

Проведенные численные расчеты на ПЭВМ показывают, что при учете влияния активного сопротивления разрядного контура генератора ГИТ значения импульсного тока  $i_n(t)$  могут быть найдены из приближенного выражения:

$$i_n(t) \approx \frac{2U_0}{3L_n L_0 C_k b^2 c} e^{-\delta t} \sin^3(ct), \quad (6)$$

где  $\delta = 0,5 (R_0 + R_n) (L_0 + L_n)^{-1}$ .

Применив приведенные соотношения, проведем численный расчет импульсного тока  $i_n(t)$  в нагрузке генератора ГИТ (рис. 1). Пусть емкостной накопитель рассматриваемого ГИТ имеет следующие электрические параметры:  $C_0 = 2$  мкФ;  $L_0 = 1,5$  мкГн;  $R_0 = 0,5$  Ом, а активно-индуктивная нагрузка составляет:  $R_n = 0,1$  Ом;  $L_n = 0,5$  мкГн. При рабочем напряжении  $U_0 = 2$  кВ в ГИТ, в котором не применяется емкость  $C_k$ , максимальное расчетное значение тока  $i_n(t)$  будет равно  $I_{um} = 1,28$  кА, а круговая частота такого генератора будет иметь значение  $\omega_k = 0,4769 \cdot 10^6$  с<sup>-1</sup>. В таком классическом ГИТ коэффициент  $\eta_p$  равен  $\eta_p = 0,103$ . Определим КПД разрядного контура генератора с применением корректирующей емкости  $C_k$ . Используя соотношение (4), находим, что расчетное значение корректирующей емкости будет равно  $C_k = 1,29$  мкФ. Исходя из наличия высоковольтных емкостей, выбираем рациональное значение  $C_k = 1,25$  мкФ. Согласно (2), круговая частота  $c$  разрядного контура генератора ГИТ будет равна  $c = 0,489 \cdot 10^6$  с<sup>-1</sup>. Исходя из выражения (6), находим, что максимальное значение тока  $i_n(t)$  в нагрузке рассматриваемого генератора будет равно  $I_{um} = 1,84$  кА. Коэффициент  $\eta_p$  в таком генераторе ГИН будет равен  $\eta_p = 0,212$ .

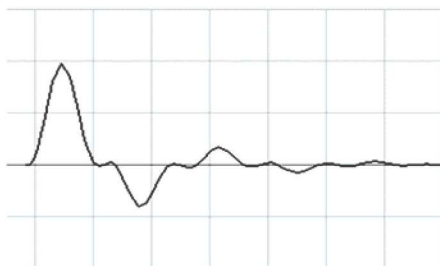


Рисунок 3 – Расчетная кривая тока  $i_n(t)$  в нагрузке генератора ГИТ с использованием емкости  $C_k = 1,25$  мкФ (5 мкс/дел, 1 кА/дел)

На рис. 3 приведена расчетная кривая тока  $i_n(t)$  в нагрузке рассматриваемого генератора ГИТ. Расчет проводился на ПЭВМ с использованием прикладной программы EWB-5.12 [6]. Согласно полученным результатам, при

указанных электрических параметрах импульсный ток  $i_n(t)$  в генераторе достигает своего максимального значения  $I_{nm} = 1,95$  кА при  $t_m = 3,06$  мкс. Соответствие результатов расчета подтверждают и проведенные на высоковольтном макете ГИТ экспериментальные исследования. Так, максимальное измеренное значение  $i_n(t)$  в нагрузке генератора было примерно равно  $I_{nm} \approx 1,9$  кА, а своего максимума ток достигал при  $t_m \approx 3,1$  мкс.

### Работа генератора ГИН с использованием корректирующей емкости.

Проведенные вычисления показывают, что без учета влияния активных сопротивлений импульсное напряжение  $u_p(t)$ , действующее на разрядный промежуток  $P_2$  в ГИН (рис. 2), может быть представлено в виде:

$$u_n(t) = \frac{U_0 C_0}{C_0 + C_k} [1 - \cos(rt)], \quad (7)$$

где  $r = (C_0 + C_k)^{0,5} C_0^{-0,5} C_k^{-0,5} (L_0 + L_n)^{-0,5}$ .

Ясно, что своего максимального значения импульсное напряжение  $u_p(t)$  в рассматриваемом генераторе ГИН достигнет при выполнении условия:

$$rt_m = \pi. \quad (8)$$

Из выражения (8) следует, что задавав время нарастания  $t_m$  напряжения  $u_p(t)$ , можно определить электрические параметры емкости  $C_k$  как:

$$C_k = \frac{t_m^2 C_0}{\pi^2 C_0 (L_0 + L_n) - t_m^2}. \quad (9)$$

Задав время нарастания  $t_m = 1$  мкс, определим емкость  $C_k$  для ГИН, имеющего следующее электрические параметры:  $C_0 = 2$  мкФ;  $L_0 = 1,5$  мкГн;  $R_0 = 0,5$  Ом;  $R_n = 0,1$  Ом;  $L_n = 0,5$  мкГн. Применив выражение (9), находим, что для данного генератора расчетное значение емкости  $C_k$ , будет равно  $C_k = 0,052$  мкФ. Выбираем значение  $C_k = 0,05$  мкФ. Согласно (7), при рабочем напряжении  $U_0 = 2$  кВ максимальное значение  $u_p(t)$ , будет равно  $U_{nm} = 3,89$  кВ. Если в генераторе не применяется корректирующая емкость, то максимальное значение импульсного напряжения  $u_p(t)$ , будет равно  $U_{nm} = 2$  кВ.

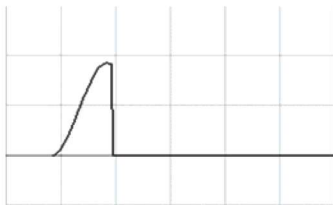


Рисунок 4 – Расчетное напряжение  $u_p(t)$  в ГИН с корректирующей емкостью  $C_k = 0,05$  мкФ при срабатывании разрядника  $P_2$  в максимуме напряжения (1,95 кВ/дел; 1 мкс/дел)

Если разрядник  $P_2$  в генераторе ГИН (рис. 2) настроен так, чтобы его срабатывание происходило в момент времени  $t_m$ , то на нагрузке можно полу-

чать срезанные импульсы напряжения, амплитуда которых будет значительно выше напряжения  $U_0$ .

На рис. 4 приведена расчетная кривая импульсного напряжения  $u_p(t)$  в ГИН с указанными параметрами. Расчет проводился на ПЭВМ с учетом влияния активного сопротивления разрядного контура генератора. Результаты расчета показывают, что своего максимального значения  $U_{\text{шт}} = 3,68$  кВ импульсное напряжение  $u_p(t)$  достигает в момент времени  $t_m = 1$  мкс. Проведенные дальнейшие исследования работы генератора показали хорошее совпадение экспериментальных и расчетных данных.

## Выводы

1. Установлено, что генераторы ГИН с применением рационально выбранной корректирующей емкости  $C_k$ , включенной параллельно  $RL$ -нагрузке, имеют высокий КПД разрядного контура. Проведен анализ работы такого генератора и получены соотношения для расчета амплитудно-временных характеристик (ABX) импульсного тока в нагрузке и обоснованного выбора емкости  $C_k$ . Полученные результаты могут быть использованы при проведении малозатратной модернизации мощных генераторов импульсных токов.
2. Теоретически и экспериментально исследована работа генератора ГИН (рис. 2). Данный генератор может быть применен для формирования высоковольтных срезанных импульсов напряжения с заданным временем нарастания. Показано, что при указанных электрических параметрах рассматриваемый генератор позволяет получать высоковольтные импульсы в 1,6 раза большей амплитуды, чем установки, собранные по традиционной схеме.

**Список литературы:** 1. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. – М.: Мир, 1972. – 391 с. 2. Патент України № 6279, МКІ НОЗКЗ/53. Генератор імпульсних струмів // Баранов М. І., Ігнатенко М. М., Колобовський А. К. – Опубл. Бюл. № 5. – 16.05.2005. – 4 с. 3. Баранов М.І., Ігнатенко Н.Н. Повышение энергетической эффективности разрядных цепей генераторов больших импульсных токов с мощными емкостными накопителями энергии // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХП», 2009. – № 49. – С. 3-14. 4. Патент України № 12376, МПК НОЗКЗ/53. Установка для отрицания импульсного тока блискавки // Баранов М.І., Ігнатенко М.М., Колобовський А.К. – Опубл. Бюл. № 2. – 15.02.2006. – 4 с. 5. Ігнатенко Н.Н. Расчет переходных процессов в генераторах тока молнии с замыкателями нагрузки // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХП», 2009. – № 11. – С. 38-45. 6. Карлауцук В.І. Електронна лабораторія на IBV PC. Програма Electronics Workbench і її застосування. – М.: Солон – Р, 2000. – 506 с.

Поступила в редакцію 25.03.2011.